

三种主流的海水淡化工艺

郑晓英,王 翔

(北京工业大学,北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,北京 100124)

摘 要 海水淡化技术是解决淡水资源短缺的重要途径,与此同时世界各国也日益将这一技术视为获取淡水资源战略储备技术,全球海水淡化产业不断增长,其重要性不容忽视。该文介绍了目前商业用最为广泛的海水淡化工艺:低温多效蒸馏(LT-MED)、多级闪蒸(MSF)、反渗透(RO),分析了其工艺原理、工艺特点、发展趋势以及我国海水淡化产业发展现状。

关键词 海水淡化 低温多效蒸馏 多级闪蒸 反渗透

中图分类号: TU991;P747 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2016)06-0111-05

Three Technological Processes for Mainstream Seawater Desalination

Zheng Xiaoying, Wang Xiang

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Seawater desalination technology is an important way to solve the shortage of fresh water resources. Meanwhile, the global desalination industry is growing continuously, and the world is increasingly regarding the technology as a strategic reserve of obtaining fresh water resources, so its importance is indispensable. This paper introduces three currently most widely used commercial seawater desalination technologies: low temperature multiple effect desalination (LT-MED), multi-stage flash (MSF), reverse osmosis (RO). Besides, its technological principle, process characteristics, developing trend as well as the present situation of Chinese desalination industry are also analyzed.

Keywords seawater desalination low temperature multiple effect desalination (LT-MED) multi-stage flash (MSF) reverse osmosis (RO)

DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2016.06.022

根据世界观察研究所的研究报告,预计到2025年全球将有三分之二的人口面临缺水问题,淡水资源问题将会影响包括发达国家在内的每一个国家,水资源淡化技术是未来缓解淡水资源危机的重要途径之一^[1]。水资源的淡化是将含盐量高的水转化成可以供人类使用的淡水,就海水而言,我们的水源几乎是取之不尽的。在过去的几十年时间内,在缺水地区不断建立海水淡化厂以补充紧张的淡水资源,未来海水淡化总产能将会持续高速增长,截至2016年,全球海水淡化总产能预计将达到380亿m³

每年,是2008年的2倍^[2]。如今,商业化的海水淡化技术可以分为两种类型:热法和膜法,热法主要是低温多效蒸馏工艺(LT-MED)和多级闪蒸工艺(MSF),膜法主要是反渗透海水淡化工艺(SWRO)^[3],多年来的发展经验表明,这三种工艺未来将统领和竞争全球海水淡化市场,成为各国沿海区域和海岛的重要供水方式^[4]。

1 三种主流的海水淡化工艺

1.1 低温多效蒸馏工艺(LT-MED)

1.1.1 基本原理和系统构造

LT-MED在一系列压力递减的蒸发室中进行,蒸发室的个数称为效数,典型的LT-MED淡化厂的效数一般有7效以上^[5]。如图1所示,每个蒸发室内安装有一系列蒸发管束,蒸发管束具有优良的传

[收稿日期] 2016-07-10

[作者简介] 郑晓英(1976—)女,副教授,研究方向为水处理理论与技术。

[通讯作者] 王翔,电话:13120303151;E-mail:wwwangxiang@126.com。

热性能和一定的机械强度。系统中,往第一效蒸发管中通入来自外部热源的蒸汽;海水从蒸馏系统的右边进入,被最后一效中生成的蒸汽预热后,一部分作为蒸馏系统的补充水。进入系统的海水从每一效的顶部喷洒到内部的蒸发管束上,在重力的作用下沿蒸发管的表面从上而下流动,并不断从蒸发管表面吸收热量,部分蒸发生成蒸汽,同时蒸发管内部的蒸汽放热冷凝生成淡水被收集。在系统上一效中生成的二次蒸汽经除雾器去除盐类物质后进入到下一效的蒸发管中,直接作为下一效蒸发管的加热蒸汽。沿蒸汽传输方向,效室内的压力和温度逐渐下降,蒸发、冷凝在各效重复进行,只有在第一效蒸发管中冷凝的淡水回流至蒸汽发生器,其余各效即成为产品水。

1.1.2 技术特点

LT-MED 通过控制蒸发室内的压力,实现海水在较低温度($<70^{\circ}\text{C}$)条件下的蒸发和冷凝循环,大大减弱了设备的结垢和腐蚀问题,运行寿命长、维护量少,而且使得应用廉价传热材料的可能性大大增加。由于 LT-MED 的冷凝过程完全发生在蒸发管内部,系统受海水水质的影响非常小。在较低的温度条件下,海水中的杂质几乎不发生相变,产品水的 TDS 可达 5 mg/L 以下。LT-MED 主要利用低压蒸汽或者是发电厂的余热,这也使得其能够利用多种低位热能而具备节能的特色。根据系统规模、蒸发室个数以及蒸发管的传热效率的不同,造水比(生产淡水和消耗蒸汽的质量比)为 $8\sim 15$,其运行负荷可以是设计负荷的 $40\%\sim 110\%$,而保持造水比不变,这种操作弹性是一个重要优势,如果因某种原因蒸汽量减少或者增大,对 LT-MED 的运行影响并不大。但由于 LT-MED 的操作温度超过 70°C ,这也成为该工艺技术进一步提高热效率的制约因素。

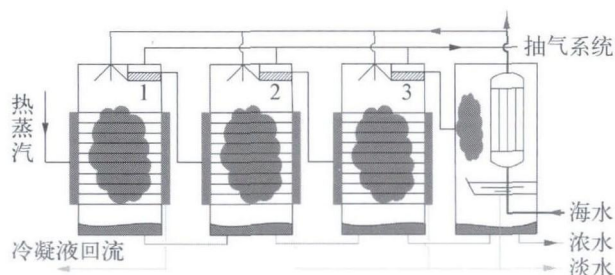


图1 三效低温多效蒸馏海水淡化工艺原理图

Fig. 1 Schematic Diagram of Three Effects of LT-MED on Seawater Desalination

1.1.3 当前发展趋势

由于在较低温度下,海水的结垢和腐蚀现象会很大程度减轻,根据这个原理,20 世纪 70 年代末以

色列 IDE 公司开发出了 LT-MED^[6]。从热能利用和转化的角度来看,LT-MED 的效率要比 MSF 高,这使得 LT-MED 的市场优势明显,在新建的热法工艺中被广泛采用。就全球市场而言,尽管 LT-MED 淡化厂的数量相对 MSF 来说还较少,但由于 LT-MED 的开发使多效蒸馏具有了诸多的优越性,并且其在利用低温余热的蒸汽后,制水成本较反渗透工艺亦具有相当高的竞争力,建成数量正在不断增加。未来低温多效蒸馏工艺研究的重点是新型廉价材料的应用、装置规模的扩大等技术,旨在进一步降低设备造价和运行成本,提高竞争力^[6]。

1.2 多级闪蒸工艺(MSF)

1.2.1 基本原理和系统构造

MSF 的原理是将海水在一系列压力逐渐减低的闪蒸室内进行闪蒸,闪蒸室的个数称为级数,超大型的 MSF 淡化厂可达 50 级^[7]。如图 2 所示,海水首先通过闪蒸室顶部的冷凝管束,在冷凝管束中被各级闪蒸室内生成的逐渐升温的蒸汽预热,最后到达盐水加热器。盐水加热器的加热蒸汽来自火力发电厂,海水在加热器内被加热到最高温度($90\sim 115^{\circ}\text{C}$)后送入第一级闪蒸室。闪蒸室内的压力低于海水所对应的饱和蒸汽压,即海水被送入闪蒸室的温度高于在闪蒸室内压力条件下的沸点温度,因此海水迅速沸腾,一直到温度降到沸点,一部分海水汽化,生成的蒸汽通过除雾器去除溶解的盐类物质,最后在顶部的进水冷凝管束表面冷凝后生成淡水被收集。没有汽化的海水温度降低,流入到下一个压力较低的闪蒸室继续闪蒸,这样重复蒸发和冷凝,持续生成淡化水。

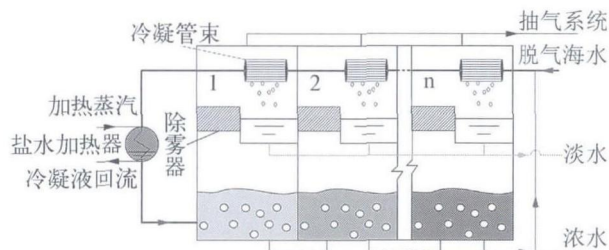


图2 多级闪蒸海水淡化工艺原理图

Fig. 2 Schematic Diagram of MSF for Seawater Desalination

1.2.2 技术特点

MSF 更传统一些,技术成熟、可靠,运行安全、稳定,其装置具有大型化和超大型化的特点。由于多级闪蒸工艺将海水的加热和蒸发分开进行,相对于早期的多效蒸馏工艺,MSF 设备的结垢现象较轻且容易去除。大型的 MSF 通常设计成浓水循环式

系统,回收部分浓水作为系统补充进水,循环一定比例的浓水可以减少蒸汽和海水的需求量,同时还可以减少阻垢剂和消泡剂的使用。MSF 的级数和造水比受到多种因素的影响,通常,在其他因素均相同的情况下,垂直的冷凝管束 MSF 系统,造水比大约是级数的 $1/2 \sim 1/3$,而平行的冷凝管束 MSF 系统,造水比大约是级数的 $1/4^{[8]}$ 。脱气处理是循环式 MSF 系统中重要的预处理环节,脱气处理可以去除进水中的氧气、氮气和二氧化碳等溶解性气体。如果对进水不进行脱气处理,这些溶解性气体将会在闪蒸的过程中被释放出来,这些气体的导热性较差,会降低冷凝管束的传热速率,同时二氧化碳和氧气还会加速设备的腐蚀。MSF 的动力消耗大,设备的操作弹性小,不适用于造水量变化大的场合。

1.2.3 当前发展趋势

MSF 自 20 世纪 60 年代开始迅速占领中东地区市场,这也是海水淡化技术大规模应用的开始^[9,10,12]。目前仍是全球市场总产能第二的海水淡化工艺,其发展和应用主要以中东海湾地区为主。该技术与 LT-MED 相比,能耗偏高,在我国等新兴海水淡化市场的应用较少,近些年来,几乎没有大型的 MSF 新建项目,取而代之的是热法工艺 LT-MED。随着全球海水淡化产业的兴起和新技术的开发应用,MSF 未来的市场份额预计会进一步缩减。

1.3 反渗透海水淡化工艺(SWRO)

1.3.1 基本原理和系统构造

反渗透即是渗透的逆过程。渗透是一种自然现象,稀溶液中的水分子会以较快的速度透过半透膜向浓溶液一侧扩散,如图 3 所示。淡水侧的液面不断下降,从而产生一个静水压力差,当这一静水压力差的存在使两侧的水分子扩散速度相等时,渗透达到平衡,此时的静水压力差值称为渗透压(海水和淡水界面之间的渗透压约为 $2.4 \text{ MPa}^{[11]}$)。反渗透过程则刚好相反,在 SWRO 中,在海水一侧施加一个大于海水渗透压的压力将导致海水中的水分子透

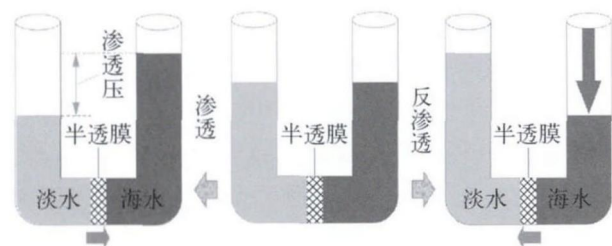


图3 渗透和反渗透原理图

Fig. 3 Illustrations of Osmosis and Reverse Osmosis

过膜而盐分被截留下来,理论上,这种外加压力越大,海水中的水分子反渗透的速度越快。

实现反渗透过程最核心的部件是人工合成的反渗透半透膜,它几乎只能让水分子透过。反渗透膜的平膜膜片需要制成一定的构型才能用于水处理工程,如今,在海水淡化中,最主要采用的是芳香聚酰胺类卷式膜元件。在两两平膜膜片之间夹入产水隔网,并分别沿膜层的三条边将膜层胶结在一起,然后和进水隔网组合后卷绕在多孔中心管上,最后在两端装上穿孔端盖并封装,即制成卷式膜元件。商业化的反渗透膜元件有多种规格,海水淡化中使用最多的膜元件直径为 200 mm ,标准长度为 1000 mm 。在 SWRO 系统中,将 1 个或几个卷式膜元件连接起来,装入圆柱形的压力容器中,多个压力容器连接组合后构成反渗透单元。通常,一个压力容器中可以包含 6~8 个膜元件,一个中型的 SWRO 系统要由上千个压力容器组成。

如图 4 所示,SWRO 由高压泵、压力容器和能量回收装置组成。海水经预处理后,由高压泵加压送入反渗透单元的压力容器,海水首先通过第一个膜元件,并在该膜元件螺旋卷绕的进水隔网通道内流动,在较高的压力下,一部分水分子不断渗透过膜,经产水隔网流道进入到卷式膜元件的中心管,生成产品水,其余进水沿着水流方向继续流动至下一个膜元件。这一过程依次进行,当进水每通过下一个膜元件时,进水浓度增大,流过最后一个膜元件时,进水成为浓水,浓水流出压力容器后经能量回收装置回收剩余压能后排出。

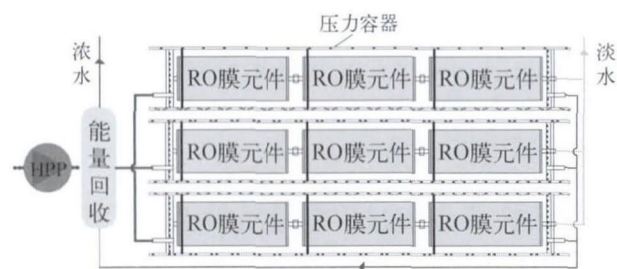


图4 反渗透海水淡化工艺原理图

Fig. 4 Schematic Diagram of SWRO for Seawater Desalination

1.3.2 技术特点

与热法不同,SWRO 并没有蒸发和冷凝的相变过程,其最主要的能耗是实现反渗透过程的高压泵送电能,这使得反渗透的制水成本相对热法而言要低。另外,相对热法其设备还具有模块化的结构特点,工艺灵活性较高,其局部设施的暂停维护可不影

响整个系统其余部分的运行。但是,SWRO 需要复杂而精细的预处理过程,不同商业膜厂商对其聚酰胺类反渗透膜的进水 SDI、pH、温度、余氯等指标均具有严格限制要求。在预处理不达标时,膜表面的污染、结垢会加速;运行中,膜组件的使用寿命、能耗和产品水水质均会受到影响,进而提高制水成本。SWRO 的预处理工序根据取水方式和海水水质而不尽相同,对于开放式的取水方式而言,现在比较流行的是在反渗透前上溶气气浮 + 超滤 + 5 μm 保安过滤器来保证反渗透的进水水质要求。对平均进水 TDS = 35 000 mg/L 的 SWRO 系统,进水压力在 5.0 MPa 以上,运行回收率(产水和进水的体积比)在 40% ~ 60%。能量回收装置是另一关键设备,SWRO 的快速发展,除了膜材料和膜组件的不断优化,效率不断提升的能量回收装置在反渗透系统中的使用功不可没。如今,高效率的 PX 型压力回收装置能够回收浓水中 95% 以上的能量用以加压进料海水,这使反渗过程的能耗下降了近乎一半。一级反渗透出水 TDS 约为 300 ~ 500 mg/L,这已经满足世界卫生组织对饮用水 TDS 指标的限定要求(500 mg/L),SWRO 在缺水区域已经大规模用于饮用水供给。

1.3.3 当前发展趋势

20 世纪 80 年代,SWRO 开始成为与传统热法工艺相竞争的工艺^[12]。由于设备投资少、建造周期短、能耗较低等诸多优点,发展速度很快,当前已成为全球海水淡化市场最主要的工艺。目前,一级 SWRO 基本上都是用于市政行业,这也是反渗透工艺的产能迅速增长的原因。未来反渗透工艺的研究将会集中在开发更加节能和耐用的新型反渗透膜和膜组件,减少运行能耗和维护费用,降低制水成本。

2 三种工艺的技术经济指标对比

三种工艺的技术经济指标对比如表 1 所示。

当前,热法和膜法都是已经大规模工程应用的成熟技术。总体来说,热法具有系统稳定、可靠、产品水水质高的优点,缺点是能耗较高;而膜法技术具有一次性投资省、能耗较低、操作弹性大的优点,缺点主要是维护量较大。具体采用何种工艺,需要对工程的能源供给、地理位置、海水水质、系统规模、淡化水的用途等因素进行综合评估后确定。

表 1 三种工艺的技术经济指标对比
Tab. 1 Comparison of Technical-Economic Indicators for Three Technological Processes

项 目	MSF	LT - MED	SWRO
a. 技术指标			
1. 技术成熟度	成熟	成熟	成熟
2. 产水规模	大	中、大	小、中、大
3. 进水温度	0 ~ 35 $^{\circ}\text{C}$	0 ~ 35 $^{\circ}\text{C}$	15 ~ 25 $^{\circ}\text{C}$
4. 操作温度	90 ~ 120 $^{\circ}\text{C}$	< 70 $^{\circ}\text{C}$	15 ~ 25 $^{\circ}\text{C}$
5. 预处理	简单	简单	严格(SDI < 3)
6. 产品水 TDS	< 50 mg/L	< 5 mg/L	< 500 mg/L(一级)
7. 运行维护	维护量少	维护量少	维护复杂,需要定期清洗、换膜
8. 系统弹性	小	较大	大
9. 海水水质影响	小	小	大
10. 同等规模占地 面积	大	大	小
11. 同等规模投资	最高	高	较高
12. 运行寿命 ^[13]	30 年以上	30 年以上	大约 15 年
b. 经济指标(商业化 大型工程项目的 运行能耗) ^[14]			
1. 热能/(kW · h · m ⁻³)	7.5 ~ 12	4 ~ 7	—
2. 电能/(kW · h · m ⁻³)	2.5 ~ 4	1.5 ~ 2	3 ~ 4
3. 总能耗/(kW · h · m ⁻³)	10 ~ 16	5.5 ~ 9	3 ~ 4
4. 总制水成本/(\$ · m ⁻³)*	0.8 ~ 1.5	0.7 ~ 1.2	0.5 ~ 1.2

注: * 为运行成本 + 设备折旧费

3 我国海水淡化产业进展

近十多年来,我国政府高度重视海水淡化技术,海水淡化产业取得了较快的发展,海水淡化技术基本成熟,并逐步建立了我国海水淡化产业体系^[15]。由于我国能源结构的特点,在已建成的海水淡化工程中,基本上都是采用反渗透和低温多效蒸馏技术。我国海水淡化产能以每年超过 10% 的速度增长(图 5),截至 2015 年底,我国已建成海水淡化工程 121 个,总设计产能为 $100.88 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中反渗透工程 106 个,总设计产能为 $65.45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占全国海水淡化设计总量的 64.88%;低温多效蒸馏工程 13 个,总设计产能为 $34.80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占 34.50%;多级闪蒸工程 1 个,设计产能为 $6\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,占 0.6%;应用其他技术的工程 1 个。目前,国内最大的膜法海水淡化工程设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最大的低温蒸馏法海水淡化工程设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[16]。与先进国家相比,我国在工程规模、

工程经验积累以及在膜法工艺的关键设备如高压泵、能量回收装置、反渗透膜的国产化等方面还有差距。

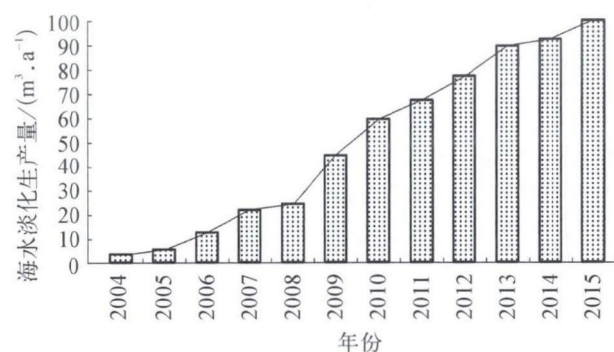


图5 我国海水淡化产能增长图

Fig.5 Growth of Desalination Capacity in China

4 结语

截至目前,海水淡化已经成为大规模开发淡水资源的成熟技术,海水淡化是淡水资源战略的重要组成部分。由于亚太地区尤其存在人口和经济增长带来的淡水资源需求,近年来,全球海水淡化的产业中心正从中东地区向亚太地区转移,未来我国的海水淡化产业将会迎来一个持续的高速增长期。

参考文献

[1] Karagiannis I C, Soldatos P G. Water desalination cost literature: review and assessment [J]. *Desalination*, 2008, 223 (1-3): 448-456.

[2] Elimelech M, Phillip M. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment [J]. *Science*, 2011, 333 (6043): 712-717.

[3] Raluy G, Serra L, Uche, *et al.* Life cycle assessment of MSF,

MED and RO desalination technologies [J]. *Energy*, 2006, 31 (13): 2361-2372.

[4] Khawajia A D, Kutubkhanah A K, Wie J M, *et al.* Advances in seawater desalination technologies [J]. *Desalination*, 2008, 221 (1-3): 47-69.

[5] 张岩岗. 低温多效海水淡化技术在首钢京唐钢铁厂的创新应用 [J]. *中国钢铁业*, 2012(4): 23-24.

[6] 于开录, 吕庆春, 阮国岭. 低温多效蒸馏海水淡化工程与技术进展 [J]. *中国给水排水*, 2008, 24(22): 82-85.

[7] 王非. 我国海水淡化的现状与钛的应用 [J]. *钛工业进展*, 2013, 30(5): 6-12.

[8] Australian national water commission. Emerging trends in desalination: a review [R]. *Waterlines Report Series*, 2008.

[9] 李志敏, 曾秋苑, 李淳, 等. MSF/RO/ED 海水淡化技术研究 [J]. *海水淡化技术研究*, 2012, 26(5): 125-128.

[10] 解利昕, 李凭力, 王世昌. 海水淡化技术现状及各种淡化方法评述 [J]. *化工进展*, 2003, 22(10): 1081-1084.

[11] Jorg Menningmann. Seawater Desalination With Reverse Osmosis [EB/OL]. <http://www.wwdmag.com/desalination/seawater-desalination-reverse-osmosis>.

[12] Bart Van der Bruggen, Carlo Vandecasteele. Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination [J]. *Desalination*, 2002, 143(3): 207-218.

[13] Gao Feng, Larriq Cedric, *et al.* Comparison between low-temperature multiple effect distillation and reverse osmosis [C]. Qingdao: Qingdao International conference on Desalination and Water Reuse, 2013.

[14] Noreddine Ghaffour, Thomas M. Missimer, *et al.* Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability [J]. *Desalination*, 2013, 309(2): 197-207.

[15] 杨尚宝. 我国海水淡化进展与展望 [J]. *水处理技术*, 2014, 40(12): 1-4.

[16] 国家海洋局. 2015 年全国海水利用报告 [EB/OL]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/hykjnb_2186/201608/t20160831_53086.html.